

О- 801803

На правах рукописи



**Бобенко Надежда Георгиевна**

**Влияние структурного ближнего порядка  
на электронные транспортные свойства  
эпитаксиального графена и углеродных нанотрубок**

**01.04.07 – физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Томск – 2013**

### Официальные оппоненты:

**Козлов Эдуард Викторович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра физики, заведующий.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт Теоретической и Экспериментальной Физики

Защита состоится «17» сентября 2013 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.07, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан « 16 » августа 2013 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук**

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



830145

В конце XX и начале XXI веков были экспериментально открыты новые формы углерода, представляющие собой структуры, поверхность которых формируется шестиугольниками и пятиугольниками с атомами углерода в вершинах. Наиболее интересными и перспективными разновидностями новых углеродных структур являются углеродные нанотрубки (УНТ) и графен, электронные транспортные свойства которых чувствительны к таким характеристикам структуры наноматериалов как хиральность (для нанотрубок) или положение края листа (для графена), количество слоев в нанотрубке и графене, а также дефектность структуры. Дефектность наноструктур обусловлена наличием примесей металлических катализаторов, используемых в процессе синтеза углеродных наноматериалов, аморфного углерода, сорбированных газов, присоединенных радикалов OH, CO и топологических дефектов. Концентрация различных дефектов структуры в исследуемых материалах может составлять до 20 %, так что в структуре трубок и графена могут образовываться локальные области ближнего порядка, изменяющие их электронную структуру

Теоретически предсказано, что плотность электронных состояний (ПЭС) для бездефектного графена пропорциональна энергии Ферми ( $\epsilon_F$ ), а для нанотрубок зависимость от энергии оказывается более сложной. Также с ростом концентрации чужеродных атомов значение ПЭС вблизи уровня Ферми увеличивается, рост значений индексов хиральности для нанотрубок и краевых индексов для графена приводит к сужению кривой зависимости  $\nu(\epsilon)$ . В то же время легирование может существенно изменять ПЭС, приводя к смене типа проводимости (полупроводник-металл) в наноматериалах.

Удельное электросопротивление наноматериалов имеет большой разброс значений: для нанотрубок - от нескольких мкОм до Мом, в зависимости от диаметра, типа и вида проводимости, для графена - на 3 порядка, в зависимости от количества слоев и концентрации носителей тока, которая оказывается максимальной в точке Дирака. Низкотемпературное электросопротивление углеродных наноматериалов падает с ростом температуры, если концентрация носителей заряда совпадает с концентрацией свободных электронов в металлах. Легирование может приводить к обратному ходу температурной зависимости проводимости в области низких температур.

Теплопроводность УНТ  $k(T)$  в этом температурном интервале увеличивается до своего максимального значения, а затем уменьшается с увеличением температуры. Угол наклона кривой  $k(T)$  уменьшается относительно температурной оси с ростом диаметра трубки.

Влияние структурных особенностей на электронные транспортные свойства наиболее заметно в низкотемпературном поведении термоэдс  $S(T)$  УНТ. При температурах до 30-50 К зависимость  $S(T)$  близка к линейной и может иметь положительное (для газovaných трубок) или отрицательное (для дегазованных трубок) значение. При температуре выше 30-50 К в случае положительной термоэдс на кривой  $S(T)$  появляется излом или максимум, положение которого от-

носителем температурной оси меняется для трубок, имеющих различные характеристики (хиральность, концентрация чужеродных атомов).

В настоящее время не существует теории, позволяющей из единых физических представлений описать особенности низкотемпературного поведения ПЭС, электро-, теплопроводности и термоэдс в УНТ и графене, а также объяснить, почему может меняться тип проводимости в исследуемых наноматериалах. Более полное понимание природы низкотемпературного поведения электронных транспортных свойств углеродных нанотрубок и графена может быть достигнуто благодаря появлению новых представлений об электронном переносе в наносистемах, которые позволили бы в рамках одной модели теоретически описать электронные транспортные свойства углеводородных наноматериалов и получить результаты, качественно и количественно согласующиеся с соответствующими экспериментальными данными.

Исходя из изложенного выше, *целью диссертационной работы* является теоретическое исследование влияния структурного ближнего порядка на низкотемпературные электронные транспортные свойства эпитаксиального графена и металлизированных нанотрубок.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие *основные задачи*:

1. Исследовать влияние электронного рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка на ПЭС и низкотемпературное электросопротивление двумерной углеродной структуры (графен);

2. Изучить роль электронного рассеяния на структурных образованиях ближнего порядка в трехмерных углеродных структурах (пучки одностенных нанотрубок и многостенных УНТ) в формировании низкотемпературных особенностей ПЭС, электросопротивления, теплопроводности, термоэдс;

3. Проанализировать влияние изменения структуры (хиральность), концентрации примеси и местоположения дефектов в структуре (параметра ближнего порядка) нанотрубок на ПЭС и электросопротивление, теплопроводность и термоэдс.

#### *Научная новизна:*

1. Впервые изучено влияние рассеяния электронов на структурных неоднородностях типа ближнего порядка на ПЭС и низкотемпературное электросопротивление в эпитаксиальном графене.

2. Впервые проведено исследование роли электронного рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка в трехмерных пучках одностенных нанотрубок и многостенных углеродных нанотрубок в формировании низкотемпературных особенностей ПЭС, электросопротивления, теплопроводности, термоэдс.

3. Впервые проведен анализ влияния изменения структуры нанотрубок (хиральности), концентрации чужеродных атомов и местоположения дефектов в структуре (параметра ближнего порядка) на ПЭС, электросопротивление, теплопроводность и термоэдс. Показано, что рассеяние электронов на структурных образованиях типа ближнего порядка может приводить к формированию низко-

температурных особенностей электронных транспортных свойств УНТ и графена.

**Научная и практическая значимость** диссертации определяется тем, что созданные и верифицированные в ней новые представления о влиянии электронного рассеяния на структурных неоднородностях типа ближнего порядка для двумерной системы (графен) на низкотемпературное поведение ПЭС и электросопротивления и в трехмерной структуре (пучки одностенных УНТ и многостенные нанотрубки) на температурные зависимости ПЭС, проводимости, термоэдс и теплопроводности вносят вклад в развитие физических представлений о природе структурного состояния и свойств углеродных наноструктур. В частности, опираясь на новые представления, возможно предсказывать тип проводимости в наноматериалах в зависимости от различных факторов, оценивать значения некоторых электронных свойств в исследуемых системах, что является актуальным при их практическом применении, например, в наноэлектронике.

**Достоверность** научных результатов и выводов работы достигается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, применением современных методов расчета, а также отсутствием расхождения полученных результатов с соответствующими экспериментальными данными, как качественно, так и количественно.

**Вклад автора** состоит в проведении всех численных расчетов и анализе полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей совместно с научным руководителем по теме диссертации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие физических представлений о влиянии электронного рассеяния на структурных неоднородностях типа ближнего порядка для двумерной системы (графен) на низкотемпературное поведение плотности электронных состояний и электросопротивления и трехмерной структуры (пучки одностенных нанотрубок и многостенных нанотрубок) на плотность электронных состояний, электросопротивление, теплопроводность и термоэдс при низких температурах.

2. Утверждение о том, что тип проводимости в углеродных нанотрубках и графене зависит как от структуры материала, так и от процессов упругого электронного рассеяния на локальных областях ближнего порядка.

3. Утверждение о том, что индивидуальная углеродная нанотрубка не может быть металлической, а пучки одностенных нанотрубок и многостенные нанотрубки с диаметром, превышающим значение  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  м, всегда будут металлическими.

4. Утверждение о том, что электронные транспортные свойства углеродных материалов оказываются более чувствительны к изменению параметра ближнего порядка (местоположение дефектов в первой и второй координационных сферах) и геометрических характеристик структуры (хиральность), чем к изменению концентрации примеси.

**Апробация работы.** Материалы докладывались и обсуждались на 13 всероссийских и международных научных конференциях, таких как «DUBNA-NANO 2012» (Россия, Дубна, 2012), Труды научной сессии МИФИ-2011 (Моск-

ва, 2011), Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2011), «YUCOMAT 2011» (Монтенегро, 2011), XLIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2011), 50-й юбилейной международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2012), международной научно-методической конференции «Современное образование: проблемы обеспечения качества подготовки специалистов в условиях перехода к многоуровневой системе высшего образования» (Томск, 2012), 8-й Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (г. Троицк, 2012 г.), Нанотехнологии функциональных материалов-2012 (г. Санкт-Петербург, 2012 г.), «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия» (г. Томск, 2012 г.), V-я Всероссийская конференция молодых учёных «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (г. Томск, 2012 г.), Русско-французский форум (Новосибирск, 2013 г.), II International School-Conference "Applied Nanotechnology & Nanotoxicology" (п. Листвянка, 2013 г.).

Диссертационная работа частично поддерживалась Российским Фондом Фундаментальных Исследований (2012 гг.), 12-02-16048-моб\_з\_рос.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 16 работах. Перечень важнейших из них приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 167 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 120 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе обзорного характера " Структура, получение, применение и свойства наноуглеродных материалов "** описаны возможные виды наноструктур, представлены методы получения, исследования и область применения графена и УНТ и проанализирована взаимосвязь структурного состояния исследуемых систем с особенностями низкотемпературного поведения их электронных транспортных свойств. В заключение раздела сделана постановка задачи исследования.

**Во второй главе «Низкотемпературные плотность электронных состояний и электросопротивление эпитаксиального графена»** показано, что влияние электронного рассеяния на примесях и дефектах структуры на низкотемпературное поведение ПЭС и электросопротивления в графене может быть исследовано с помощью метода температурных функций Грина, который позволяет учесть влияние многократного упругого рассеяния электронов на структурных неоднородностях типа ближнего порядка на электронный перенос в графене.

Выбранный метод предполагает построение температурной функции Грина и ее собственно-энергетической части, входящей в уравнение Дайсона, для последующего получения времени релаксации, необходимого электрону для возвращения в исходное состояние после взаимодействия с дефектами структу-

ры. При построении функции Грина для графена был использован электронный спектр бездефектного графена. Влияние примесей и дефектов структуры на низкотемпературное электросопротивление графена было учтено с помощью параметров ближнего порядка, концентрации примеси и других характеристик исследуемого материала.

Полученное время релаксации позволило рассчитать вклад в ПЭС в графене вблизи энергии Ферми. Анализ полученного выражения показал, какие именно факторы могут быть ответственны за открытие (закрытие) щели на уровне Ферми.

С помощью формулы Друде получено выражение для вклада в электросопротивление графена от рассеяния электронов на областях ближнего порядка. Анализ полученного выражения помог выявить, чем определяется низкотемпературное поведение электросопротивления, и позволил дать возможное объяснение разброса значений удельного сопротивления графена.

**В разделе 2.1.** для описания графена как системы с примесями и локальными структурными областями с новым ближним порядком определено случайное поле сорбированных атомов (для простоты – одного сорта):

$$V(\vec{R}) = \sum_i c(R_i) U(\vec{R}_i - \vec{R}), \quad (1)$$

где  $c(R_i)$  – числа заполнения атомами позиций -  $R_i$ ,  $U$  – узельный потенциал электрона в графене. Представление  $c(R_i) = c + \delta c(R_i)$  позволяет ввести величину  $\langle \delta c(R_i) \delta c(R_j) \rangle$ , определяющую новый ближний порядок (или новые химические связи) через флуктуации концентрации  $\delta c(R_i)$  на узле  $R_i$  и среднюю (макроскопическую) концентрацию  $c = \langle c(R_i) \rangle$ ; скобки означают усреднение по случайному распределению. Фурье-образ  $\langle \delta c(R_i) \delta c(R_j) \rangle \sim \langle |c_k|^2 \rangle$  определяет структуру ближнеупорядоченной области так, что  $\langle |c_k|^2 \rangle = \frac{c(1-c)}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos k \cdot R_i$ , где  $\alpha_i$  – параметры ближнего порядка ( $\alpha_0 = 1$ ),  $N$  количество атомов в области структурной неоднородности. При всех  $\alpha_{i \neq 0} = 0$  и  $c \rightarrow 0$   $\langle |c_k|^2 \rangle$  определяет примеси в исходной системе.

Для вычисления одноэлектронных свойств (времени релаксации и ПЭС) одностичная функция Грина записывается в виде:

$$G = G_0 + \sum_i G_i^{(1)} + \sum_j G_j^{(2)} + \dots, \quad (2)$$

где  $G_0 = \frac{1}{\varepsilon - \varepsilon_F + i0}$  – функция Грина электронов в чистом графене,  $G_i^{(1)} = c(R_i) \int G_0(\vec{r}, R) U(R - R_i) G_0(R, \vec{r}') dR$ . Переходя в  $p$ -представление и усредняя по беспорядку, получим усредненную функцию Грина электрона в «грязном» графене

$$\langle G \rangle = G_0 + G_0^2 \Sigma, \quad (3)$$

где собственная энергетическая часть  $\Sigma$ , рассчитанная с учетом рассеяния электронов на дефектной структуре графеновой плоскости, имеет вид

$$\Sigma(p, \varepsilon) = -i2\pi C U_0^2 \nu_0 \text{sign} \varepsilon \left( 1 - \frac{1-C}{N} \sum_{i=0}^N \alpha_i + \frac{1-C}{N} \sum_{i=0}^N \alpha_i \frac{R^2 m}{h^2} (\varepsilon + \varepsilon_F + i0 \text{sign} \varepsilon) \right). \quad (4)$$

Здесь  $U_0$  - эффективный потенциал многократного упругого рассеяния электронов на дефектах структуры и  $\nu_0 = \frac{m}{2\pi\hbar^2}$  - затравочная ПЭС на уровне Ферми.

Первое слагаемое в (4) соответствует вкладу от рассеяния на примеси, второе и третье - на структурах с новым ближним порядком.

Для вычисления обратного времени релаксации  $\frac{1}{\tau} = -\text{Im} \Sigma$  и вклада в ПЭС  $\Delta\nu = -\frac{1}{\pi} \text{Im} \text{Sp} \langle G \rangle - (i_0)$  воспользуемся законом дисперсии для идеальной графеновой плоскости вблизи  $\varepsilon_F$

$$\varepsilon_F = \hbar k \nu_F, \quad (5)$$

где  $\nu_F \approx 10^6 \text{ м/с}$ .

В результате вычислений получено следующее выражение для обратного времени релаксации электронов в графене:

$$\frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2\tau_{np}} + \pi U_0^2 \nu_0 \frac{c(1-c)}{N} \sum_{i=0}^N \alpha_i B T, \quad (6)$$

где  $B = \pi \frac{R^2 m}{\hbar^2} k \approx 0.1 \text{ К}^{-1}$ ,  $\frac{1}{\tau_{np}} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ,  $U_0^2 = (0.05 \text{ эВ})^2$ . В дальнейшем выраже-

ние (6) будет использовано для расчета соответствующих вкладов в ПЭС и электросопротивление.

**В разделе 2.2.** рассчитан вклад в ПЭС от рассеяния электронов на областях ближнего порядка для графена в предположении о том, что энергетический спектр графена с дефектами и идеального графена отличаются незначительно. Получено выражение для вклада в ПЭС вблизи  $\varepsilon_F$  для графена с примесями и структурными дефектами типа ближнего порядка:

$$\Delta\nu = \frac{1}{h^2 \nu_F^2} \left[ \frac{\hbar}{2\tau} \ln \left( 1 + \frac{\rho_0 \nu_F (\rho_0 \nu_F - 2\varepsilon)}{\varepsilon^2 + (\hbar/2\tau)^2} \right) + 2 \text{arctg} \left( \frac{\rho_0 \nu_F (\hbar/2\tau)}{(\hbar/2\tau)^2 + (\varepsilon - \rho_0 \nu_F) \varepsilon} \right) \right]. \quad (8)$$

Полученное выражение для вклада в ПЭС вблизи энергии Ферми проанализировано при фиксированной температуре в зависимости от знака суммы параметров ближнего порядка, который может меняться при легировании или дегазации материала.

На Рис. 1А ПЭС в графене представлена в виде суммы двух слагаемых: ПЭС для чистого графена и вклада от рассеяния электронов на областях ближнего порядка.

Из рис. 1А видно, что вклад в ПЭС  $\Delta\nu(\varepsilon)$  (штрихпунктирная линия), рассчитанный с помощью формулы (8) для параметра  $\sum \alpha_i = -0.6$  (графен с примесями) при  $T=10 \text{ К}$  отрицателен, нелинейно зависит от  $\varepsilon$  и имеет минимум вблизи  $E_F$ . Вклад от ПЭС в чистом графене  $\nu_0(\varepsilon)$  линейно зависит от энергии и положи-



телен. Сумма этих двух вкладов дает кривую  $\nu(\varepsilon)$  (сплошная линия), которая имеет щель вблизи  $E_F$ , что соответствует результатам [S.Dröscher, P. Roulleau, F. Molitor, P. et al, Quantum capacitance and density of states of graphene// Appl. Phys. Lett. V. 96. PP. 152104-1-152104-3. 2010], где получена  $\nu(\varepsilon)$  для гидрированного графена (рис. 1Б). Таким образом, можно предположить, что именно найденный вклад в ПЭС графена отвечает за наличие или отсутствие щели вблизи  $E_F$ .

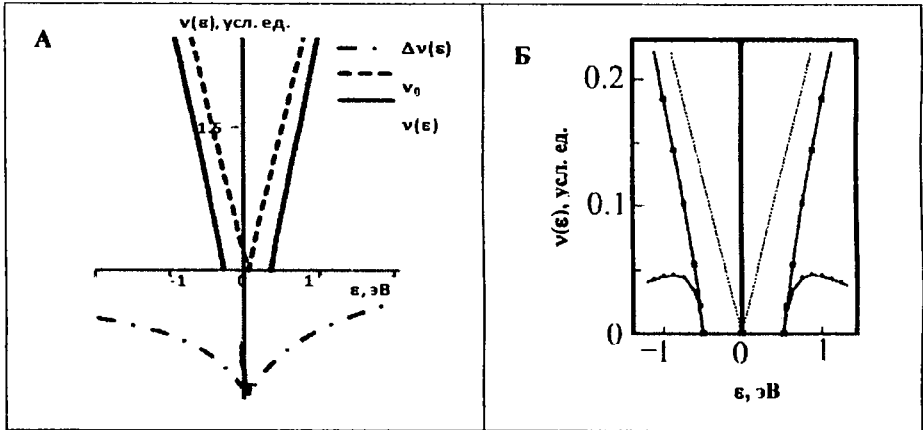


Рис. 1. А – вклад в ПЭС графена, рассчитанный при  $T=10\text{K}$  для  $\Sigma\alpha=-0.6$ , плотность электронных состояний чистого графена  $\nu_0(\varepsilon)$  и полная ПЭС  $\nu(\varepsilon)=\nu_0+\Delta\nu$ , Б - Расчетная ПЭС, полученная с использованием упрощенной М-модели: пунктирная линия - для чистого графена, сплошная линия – для гидрированного графена [S.Dröscher, P. Roulleau, F. Molitor, P. et al, Quantum capacitance and density of states of graphene// Appl. Phys. Lett. V. 96. PP. 152104-1-152104-3. 2010]

Проведенный анализ рассчитанного вклада при изменении входящих в него параметров позволил описать ряд других особенностей поведения ПЭС вблизи  $E_F$ . Показано, что на температурное поведение ПЭС в графене может оказывать влияние тип дефектов структуры. При наличии примесей или легированных атомов с ростом температуры происходит металлизация графена, а если дефекты структуры обусловлены ориентацией атомов углерода в плоскости графена, то ПЭС будет уменьшаться.

**В разделе 2.3.** рассматривается электросопротивление графена. Показано, что для неупорядоченных металлических систем с ближним порядком выражение электропроводности совпадает с известной для металлов формулой Друде:

$$\sigma = \frac{e^2 \tau n}{m}, \quad (9)$$

где  $e$  и  $m$  - заряд электрона и масса электрона, соответственно,  $n$  – число носителей тока, и, наконец,  $\tau$  - время релаксации электрона, многократно упруго рассеивающегося на структурных образованиях типа ближнего порядка. Соответствующий вклад в сопротивление графена имеет вид:

$$\rho(T) = \frac{m}{e^2 n \tau} = \frac{m}{e^2 n} \left( \frac{1}{\tau_{np}} + 2\pi l v_0^2 \frac{c(1-c)}{N} \sum_i \alpha_i B T \right). \quad (10)$$

Анализ полученного выражения для электросопротивления позволяет сделать следующие выводы:

1. Смена знака суммы параметров ближнего порядка, возможная при легировании, газации и отжиге образцов, может приводить к изменению типа температурной зависимости сопротивления, в то время как изменение концентрации примеси существенно не влияет на это свойство.

2. Зависимость электросопротивления от концентрации носителей заряда, которая по литературным данным имеет разброс данных на три порядка, может объяснить широкую дисперсию экспериментальных данных по удельному электросопротивлению графена.

**В третьей главе «Низкотемпературные свойства углеродных нанотрубок»** изучена роль электронного рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка в трехмерных углеродных структурах (пучки одностенных нанотрубок и многостенных УНТ) в формировании низкотемпературных особенностей ПЭС, электросопротивления, теплопроводности и термоэдс.

Расчеты проводились в приближении времени релаксации с помощью метода температурных функций Грина. Функция Грина в УНТ получена с учетом индексов хиральности трубок и рассеяния электронов на примесях и дефектах структуры типа ближнего порядка, рассчитаны время релаксации электрона в УНТ и вклад в ПЭС от рассеяния электронов на неоднородностях структуры типа ближнего порядка. Показано, какие процессы и почему могут приводить к открытию (закрытию) щели на уровне Ферми, а, соответственно, могут являться причиной перехода «металл-полупроводник» в металлизированных УНТ.

Показано, что низкотемпературные особенности проводимости и теплопроводности УНТ могут быть описаны с помощью классической формулы Друде и закона Видемана-Франца, соответственно. Анализ полученного вклада в электросопротивление позволил выявить, какие именно факторы ответственны за смену температурной зависимости сопротивления и его значение. Сделаны выводы о возможном влиянии рассеяния электронов на дефектах структуры на температурную зависимость электронной теплопроводности УНТ.

Также проведено исследование термоэдс и ее производной по температуре для металлизированных УНТ. Описаны возможные причины смены знака, угла наклона и местоположения максимума кривой термоэдс относительно температурной оси. Предпринята попытка объяснить, почему электросопротивление и теплопроводность УНТ характеризуются большим разбросом значений, а термоэдс нанотрубок - нет.

**В разделе 3.1** рассчитывается время релаксации электрона в нанотрубках. Расчет электронного времени релаксации для УНТ проведен в рамках той же модели, что и для графена. Отличие заключается в том, что размерность с двумерной меняется на трехмерную, а используемый электронный спектр для идеальных УНТ имеет вид:

$$\varepsilon_p = \frac{\sqrt{3}a}{2} \gamma_0 \sqrt{\left(\frac{2\pi}{C_h}\right)^2 \left(q \pm \frac{1}{3}\right)^2 + p^2} \quad (11)$$

где  $C_h = a\sqrt{n^2 + mn + m^2}$  - хиральный вектор,  $(n, m)$  - индексы хиральности УНТ,  $a$  - постоянная решетки,  $\gamma_0$  - интеграл переноса между ближайшими соседями на  $\pi$ -орбитали.

Проведенный расчет собственно-энергетической части функции Грина для УНТ позволил получить следующее выражение:

$$\Sigma(p, \varepsilon) = \Sigma(\varepsilon) = -i \left( \frac{1}{2\tau_{np}} + \frac{4\pi^2 mc(1-c)}{N} \sum_{i=0}^N \alpha_i \frac{\sin x R_i}{R_i} \right) \text{sign} \varepsilon \quad (12)$$

где  $x = \sqrt{2m(\varepsilon + \varepsilon_F + i0 \text{sign} \varepsilon)}$ . Первое слагаемое в (12) соответствует вкладу от рассеяния только на точечной примеси, второе - вклад от рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка.

Конечное выражение для времени релаксации электрона, упруго рассеянного на структурном ближнем порядке, в УНТ имеет вид:

$$\tau = \frac{h}{4\pi^2 U_0^2 c \nu_0} \cdot \frac{1}{1 + BT^{1/2}}, \quad (13)$$

где  $B = \frac{2\sqrt{2}\pi(1-c)m^{3/2}}{\nu_0 N h^3} \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i k_B^{1/2}$  и  $\nu_0 = \frac{p_0}{\pi^2 \sqrt{3} a \gamma_0 h^2} \left( p_0^2 - \left( \frac{2h}{3d} \right)^2 \right)^{1/2}$ .

**В разделе 3.2.** приведены результаты расчета вклада в ПЭС в УНТ. Полученное в работе выражение для вклада в ПЭС от рассеяния электронов на неоднородностях структуры УНТ имеет вид:

$$\Delta \nu(\varepsilon) = \frac{2.45(\pi)^{3/2} \left( \left( \frac{\sqrt{3}\pi a \gamma_0}{6C_h} - \varepsilon \right)^2 + \frac{1}{4\tau^2} \right)^{1/2}}{(C_h a \gamma_0)^{3/2} \tau \left( \frac{\sqrt{3}\pi a \gamma_0}{6C_h} - \varepsilon \right)^{3/2}}. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что рассчитанный нами вклад в ПЭС имеет достаточно сложную зависимость от хиральности, концентрации примеси и параметров ближнего порядка. Нами были исследованы все эти зависимости и проанализировано влияние указанных факторов на появление (исчезновение) щели в плотности состояний на уровне Ферми.

Отметим, что при расчете времени релаксации для УНТ было получено

выражение для затравочной плотности состояний  $\nu_0 = \frac{p_0}{\pi^2 \sqrt{3} a \gamma_0 h^2} \left( p_0^2 - \left( \frac{2h}{3d} \right)^2 \right)^{1/2}$ .

Анализ этого выражения позволяет утверждать, что металлическими будут трубки только при выполнении условия:  $d > \frac{2h}{3p_0}$  (т.е. при  $d > 10^{-9} - 10^{-8}$  м). В противном случае, даже идеальные аптсчайг-нанотрубки будут полупроводниками.

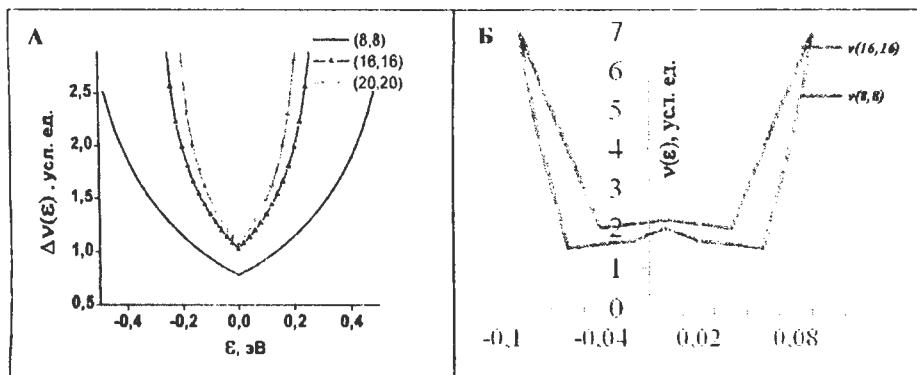


Рис.2: Вклад в плотность электронных состояний «металлических» УНТ  $\Delta\nu(\varepsilon)$ , рассчитанный для хиральностей (8,8), (16,16), (20,20) (А) и данные по плотности состояний для трубок с хиральностью (8,8) и (16,16) [Фёдоров А.С., П.Б.Сорокин Оптимизация расчетов электронной структуры углеродных нанотрубок // ФТТ 2005. -Т.47, №11.-С.2106-2111.] (Б)

Пример полученной зависимости ПЭС вблизи уровня Ферми показан на Рис. 2А, где приведены кривые вклада в ПЭС  $\Delta\nu(\varepsilon)$ , рассчитанные с помощью формулы (14) для трех типов хиральностей УНТ. Из Рис 2А видно, что с увеличением индексов хиральности  $\Delta\nu(\varepsilon)$  сужается и увеличивается по величине, что говорит о металлизации трубки и подтверждается данными, приведенными на рис.1Б, где с помощью модельных расчетов было описано поведение ПЭС в зависимости от энергии для различных значений хиральностей в металлических УНТ.

На рис. 3А представлен вклад в плотность состояний, рассчитанный с учетом многократного упругого рассеяния электронов на дефектах типа ближнего порядка, в зависимости от параметра ближнего порядка  $\alpha$  и температуры. Верхний и нижний рисунки отличаются только углом поворота 3D графика. На нижнем рисунке нагляднее видно, при каких температурах и параметрах ближнего порядка вклад в ПЭС меняет знак, т.е. увеличивает или уменьшает  $\nu(\varepsilon_F)$ , а первый показывает общую тенденцию зависимости ПЭС от параметра порядка. При  $\alpha < 0$  и определенных температурах (рис. 3а) металлические УНТ могут стать полуметаллами или полупроводниками, как, например, на рис.3Б. Точно также, полупроводниковые УНТ при увеличении  $\Delta\nu(\varepsilon)$  ( $\alpha > 0$ ) могут стать металлическими.

Также в данном разделе показано, что изменение вклада в ПЭС на уровне Ферми с ростом концентрации примеси не приводит к появлению щели на уровне Ферми, а лишь сдвигает уровень Ферми.

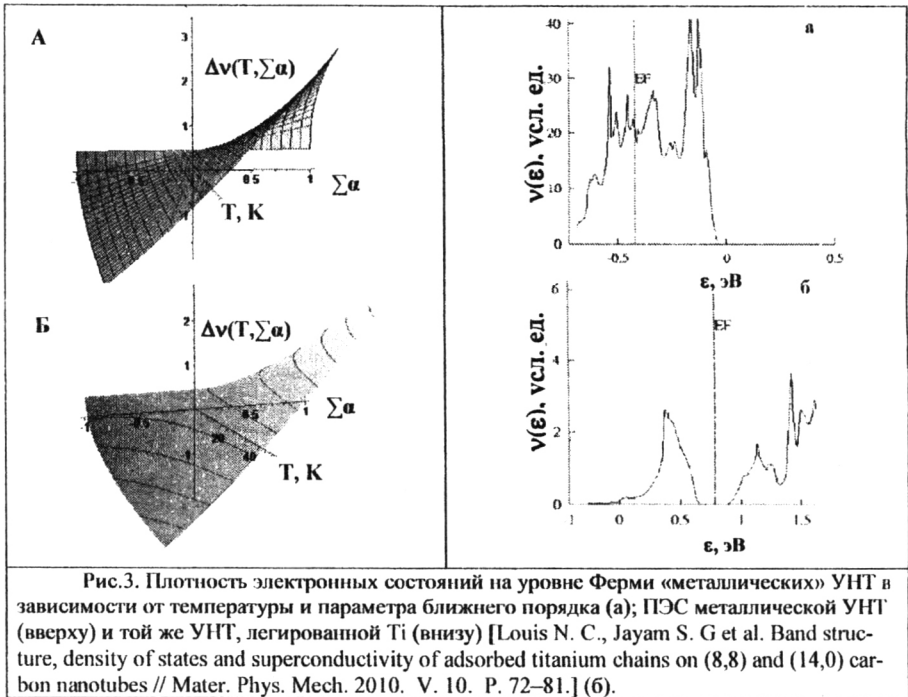


Рис.3. Плотность электронных состояний на уровне Ферми «металлических» УНТ в зависимости от температуры и параметра ближнего порядка (а); ПЭС металлической УНТ (вверху) и той же УНТ, легированной Ti (внизу) [Louis N. C., Jayam S. G et al. Band structure, density of states and superconductivity of adsorbed titanium chains on (8,8) and (14,0) carbon nanotubes // Mater. Phys. Mech. 2010. V. 10. P. 72–81.] (б).

**В разделе 3.3.** рассчитывается вклад в электросопротивление углеродных нанотрубок с учетом многократного упругого рассеяния электронов на дефектах структуры типа ближнего порядка, который в результате имеет следующий вид:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} = \frac{4\pi^2 c U_0^2 m v_0 (1 + BT^{\nu_2})}{ne^2} \quad (15)$$

В литературном обзоре показано, что в нанотрубках может меняться тип температурной зависимости сопротивления. В рамках предлагаемой модели мы связываем изменение типа температурной зависимости проводимости с влиянием процессов электронного рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка, которые при определенных условиях могут приводить к смене знака вклада в электросопротивление. Рассчитанная нами зависимость электросопротивления от температуры и параметра ближнего порядка приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что при изменении параметра порядка вклад в электросопротивление будет либо падать с уменьшением температуры (для  $\sum_i \alpha_i < 0$ ), либо расти (для  $\sum_i \alpha_i > 0$ ).

Таким образом, можно предположить, что тип температурной зависимости проводимости УНТ значительно больше зависит от рассеяния электронов на структурных неоднородностях типа ближнего порядка, чем от особенностей электронной структуры нанотрубок.

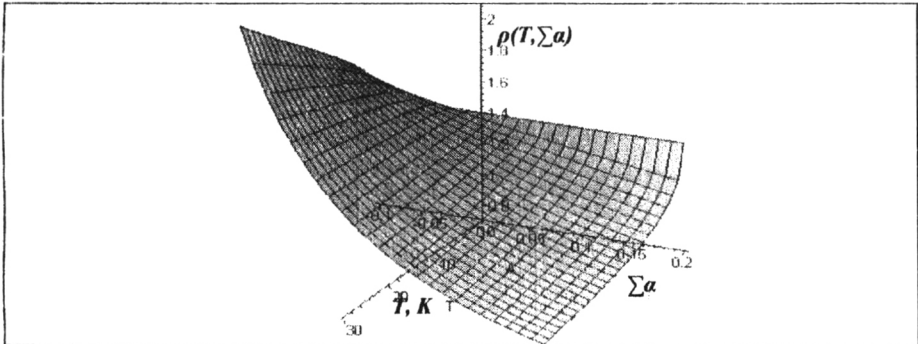


Рис.4: Электросопротивление УНТ в зависимости от температуры ( $T < 30$  К) и параметра ближнего порядка  $\alpha$ .

Так же в разделе показано, что изменение концентрации примесей лишь незначительно меняет значение сопротивления УНТ, при этом тип температурной зависимости проводимости не меняется, а разброс данных по удельному сопротивлению УНТ может быть связан с изменением концентрации носителей заряда для разных конфигураций трубок.

**В разделе 3.4.** исследуется электронная теплопроводность углеродных нанотрубок. Вклад от упругого рассеяния электронов на областях ближнего порядка в электронную теплопроводность металлизированных УНТ получен с помощью выражения для проводимости (9) и закона Видемана-Франца. Полученное выражение для вклада в электронную теплопроводность УНТ от рассеяния на примесях и неоднородностях структуры типа ближнего порядка имеет вид:

$$\chi(T) = \frac{k_B \hbar}{12cU_0^2 m v_0} n \frac{T}{(1 + BT^{0.5})}. \quad (16)$$

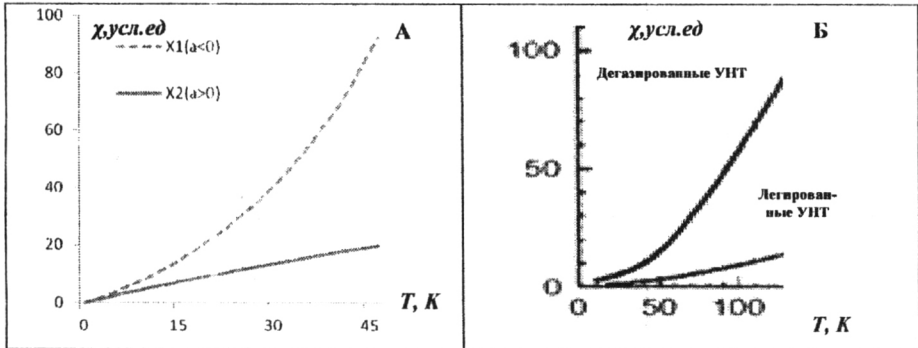


Рис. 5. А Рассчитанный вклад в теплопроводность для положительных и отрицательных значений параметра порядка [Li Q, Liu C, et al. Measuring the thermal conductivity of individual carbon nanotubes by the Raman shift method.//Nanotechnology 2009; V. 20: P.145702.]. Б. Экспериментальные зависимости теплопроводности гидрированных и дегазированных трубок

Чтобы проанализировать полученное выражение, были построены температурные кривые теплопроводности для разных значений суммы параметров ближнего порядка. Из выражения (16) видно, что при увеличении суммы параметров ближнего порядка и смене ее знака происходит уменьшение теплопроводности (Рис. 5А). Полученные зависимости соответствуют экспериментально наблюдаемым для трубок, легированных водородом и дегазированных трубок (Рис 5Б). Отметим, что в случае дегазации вклад в теплопроводность становится почти линейным по температуре в низкотемпературном пределе, что также совпадает с данными экспериментов.

На Рис. 6А представлена температурная зависимость рассчитанной электронной теплопроводности для двух значений диаметра трубок:  $d=14$  нм и 80 нм. Показано, что УНТ с большим диаметром имеют меньшее значение теплопроводности, чем УНТ с маленьким диаметром. Это может быть объяснено понижением положительного вклада от рассеяния электронов на решетке и повышением отрицательного вклада от рассеяния электронов на областях ближнего порядка.

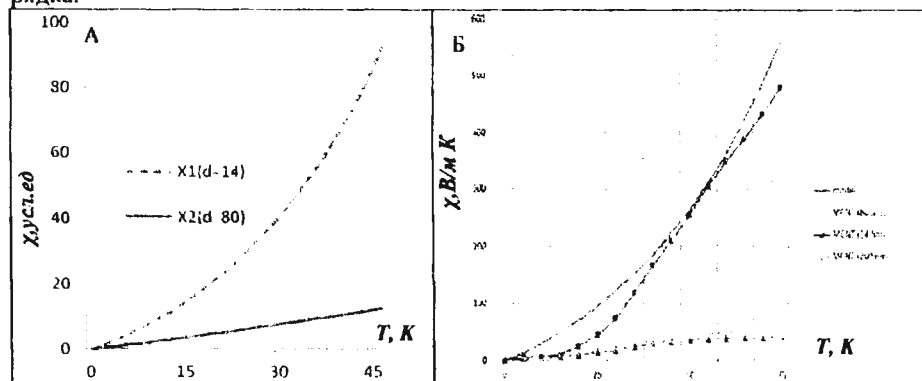


Рис. 6 А. Рассчитанный вклад в теплопроводность для двух значений диаметра: 14 нм (пунктирная линия) и 80 нм (сплошная линия). Б. Экспериментальные значения теплопроводностей для трубок различного диаметра [Kim P., Shi., McEuen P.L. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes// Phys. Rev. Lett. 2001.V87, No 21, P.215502]

Обнаруженные особенности совпадают с экспериментально наблюдаемыми в [Kim P., Shi., McEuen P.L. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes// Phys. Rev. Lett. 2001.V87, No 21, P.215502] и представленными на Рис 6Б.

Также в данном разделе показано, что полученный электронный вклад в теплопроводность на 2 порядка ниже экспериментально наблюдаемого значения теплопроводности. Это может объясняться зависимостью электронной теплопроводности от концентрации носителей заряда, которая может меняться на несколько порядков для разных конфигураций УНТ.

В разделе 3.5 получено и проанализировано выражение для термоэдс  $S(T)$ . Для вычисления термоэдс использовано выражение:

$$S = -\frac{\pi^2 T}{3e} \left( \left. \frac{\partial \nu(\epsilon)}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_F} - \frac{\partial \tau^{-1}(\epsilon)}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_F} \right) \quad (17)$$

Каждое слагаемое в (17) было рассчитано с использованием ранее полученных в 3.1 и 3.2. выражений для электронного времени релаксации и ПЭС. Результирующее выражение для термоэдс имеет вид:

$$S(T) = -\frac{\pi^2 k^2 T}{6e} \left[ \left( \frac{\pi a \gamma_0}{\sqrt{3} C_h} - \pi T \right)^{-1} - \left( \pi k T \left( 1 + \frac{1}{B T^{0.5}} \right) \right)^{-1} \right], \quad (18)$$

где первое слагаемое определяется только структурой трубки (параметром решетки и хиральностью), а второе - рассеянием электронов на примесях и дефектах структуры типа ближнего порядка.

Анализ экспериментальных данных, приведенный в обзорной главе, говорит о том, что кривая  $S(T)$  имеет изгиб и даже максимум при определенных значениях температур. Для того чтобы понять, с какими физическими закономерностями это может быть связано, исследованы первая и вторая производные от выражения (18):

$$S'(T) = -\frac{\pi k^2}{6e} \left( \frac{\pi a \gamma_0 / \sqrt{3} C_h}{\left( \pi a \gamma_0 / \sqrt{3} C_h - \pi T \right)^2} - \frac{B}{2 \pi k T^{0.5} (1 + B T^{0.5})^2} \right) \quad (19)$$

$$S'' = -\frac{\pi k^2}{6e} \left( \frac{2 \pi a \gamma_0 / \sqrt{3} C_h}{\pi a \gamma_0 / \sqrt{3} C_h - \pi T} - \frac{B (3 B T^{0.5} + 1)}{8 k T^{1.5} (B T^{0.5} + 1)^3} \right) \quad (20)$$

Анализ выражения (20) показывает, что вторая производная при любых значениях температуры и параметра  $B$ , достижимых в низкотемпературном пределе, будет всегда отрицательна, а, следовательно, в точках, соответствующих корням уравнения, полученного после приравнивания к нулю (19), будет находиться максимум функции  $S(T)$ .

Проведенные расчеты показали, что при  $\sum_i \alpha_i < 0$ ,  $\frac{\partial S(T)}{\partial T}$  имеет только мнимые корни, которые являются не физическими. Следовательно, точек экстремума в этом случае не будет. Обнаруженная особенность подтверждается результатами соответствующих экспериментов.

При  $\sum_i \alpha_i > 0$ , функция имеет два действительных корня, один из которых лежит в низкотемпературной области, а другой - вблизи 5000-6000К. Нами были рассмотрены только значения температур, лежащих в низкотемпературной области. Так как вторая производная  $S(T)$  в точках экстремума оказалась отрицательной, то  $S(T)$  имеет максимум.

В (19) входят два слагаемых, первое из которых представляет собой вклад от плотности состояний  $S_v$ , а другое - от времени релаксации  $S_\tau$ . Эти вклады имеют разные знаки, и скорость изменения одного будет увеличиваться с ростом температуры, а другого уменьшаться.

Максимум  $S(T)$  будет наблюдаться в том случае, когда скорости изменения этих вкладов равны.

Для того чтобы понять как температура максимума меняется с изменением хиральности трубки и параметра ближнего порядка, были проведены соответствующие расчеты, результаты которых представлены в таблице 1.



$\sum \alpha_i$ n	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
6	70	87	88	85,6	82,1
8	48,3	63,7	66,4	65,4	63,4
10	35,8	49,8	52,9	52,8	51,6
12	27,9	40,5	43,8	44,1	43,5
14	22,4	33,8	37,2	37,9	37,6
16	18,5	28,9	32,2	33	33

Табл. 1. Значение температуры максимума для различных значений индекса хиральности и параметра ближнего порядка при  $s=0,1$ .

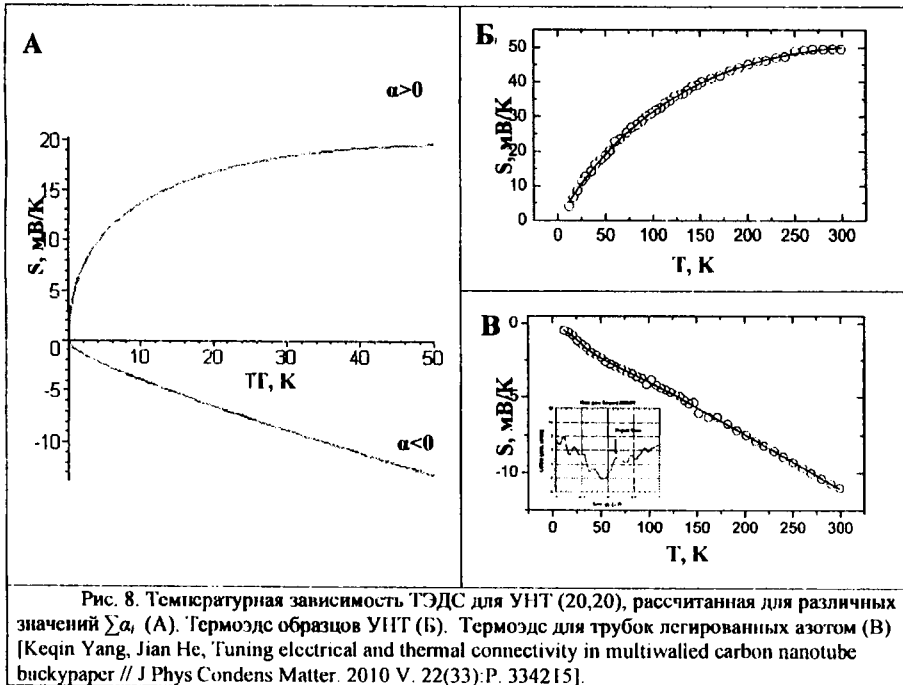
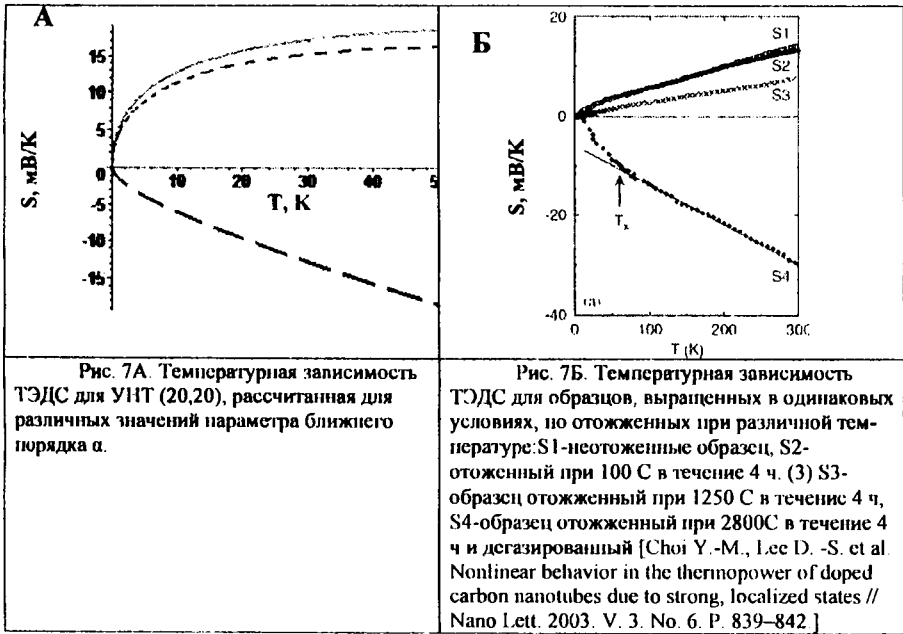
Как видно из данных таблицы, с ростом индекса хиральности уменьшается значение температуры максимума, а, следовательно, отрицательный структурный вклад растет быстрее, чем вклад от рассеяния на областях ближнего порядка. С изменением же параметра порядка значение критической температуры сначала увеличивается, а потом, начиная с некоторого значения  $\sum \alpha_i$ , опять уменьшается.

Так же, как и для других исследуемых свойств УНТ, был проведен анализ выражения для термоэдс при изменении входящих в него параметров. Температурное поведение полученного нами вклада в термоэдс представлено на рис. 7А, где  $S(T)$  рассчитана для УНТ (20,20) при различных значениях параметров ближнего порядка. Эти параметры определяют положение дефектов структуры в первой или второй координационных сферах и концентрацию примесей в УНТ. При уменьшении суммы  $\sum \alpha_i$  значение термоэдс падает и даже может изменять знак на противоположный. Данная закономерность наблюдалась в [Choi Y.-M., Lee D.-S. et al. Nonlinear behavior in the thermopower of doped carbon nanotubes due to strong, localized states // Nano Lett. 2003. V. 3. No. 6. P. 839–842.], где исследовалась температурная зависимость термоэдс образцов УНТ, выращенных в одинаковых условиях, но отожженных при различных температурах (рис. 7Б).

При повышении температуры отжига структура ближнего порядка меняется, уменьшается концентрация примесей, дефектов структуры трубки и сорбированного газа. В полностью дегазованном образце знак термоэдс меняется на противоположный.

На рис. 8А представлен вклад в термоэдс, рассчитанный с учетом многократного упругого рассеяния электронов на дефектах, в зависимости от суммы параметров ближнего порядка  $\sum \alpha_i$  и температуры. На графике наглядно видно, при каких температурах и параметрах ближнего порядка вклад в термоэдс меняет знак.

При  $\sum \alpha_i > 0$  металлические УНТ имеют положительное значение термоэдс, как, например, на рис. 8Б [Keqin Yang, Jian He, Tuning electrical and thermal connectivity in multiwalled carbon nanotube buckypaper // J Phys Condens Matter. 2010 V. 22(33):P. 334215]. В случае, когда  $\sum \alpha_i < 0$  - термоэдс  $S(T)$  становится отрицательной, что соответствует образцам, легированным азотом (рис. 8В).



Также в рамках исследования было обнаружено, что изменение концентрации чужеродных атомов существенно не влияет на значение термоэдс.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенное исследование влияния электронного рассеяния на структурных образованиях типа ближнего порядка на электронный перенос в графене показывает, что тип проводимости в этом материале может определяться упругим рассеянием электронов на локальных областях ближнего порядка. В частности, сорбция газов, соответствующая нахождению атомов газа в первой координационной сфере, приводит к открытию щели в плотности электронных состояний на уровне Ферми, а при легировании, когда инородные атомы находятся во второй координационной сфере, может происходить металлизация графена. Именно эта закономерность будет являться причиной смены типа температурной зависимости электросопротивления в графене.

Изучение температурного поведения ПЭС, электросопротивления, теплопроводности и термоэдс в пучках одностенных нанотрубок и многостенных УНТ в зависимости от хиральности и параметров ближнего порядка позволило дать возможное объяснение экспериментально наблюдаемых низкотемпературных особенностей электронных транспортных свойств.

Показано, что:

- тип проводимости в нанотрубках может зависеть как от хиральности (диаметра) УНТ, так и от параметров ближнего порядка, которые определяются местоположением дефектов в первой или второй координационных сферах;
- индивидуальная углеродная нанотрубка не может быть металлической при любых значениях индексов хиральности, а пучки одностенных нанотрубок и многостенные УНТ с диаметром, превышающим значение  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  м, независимо от хиральности всегда будут металлическими;
- с увеличением диаметра трубки уменьшается электронный вклад в теплопроводность, а изменение концентрации примеси не влияет на значение электронной теплопроводности существенно. Электронный вклад в теплопроводность на 2 порядка ниже экспериментально наблюдаемого значения теплопроводности. Смена знака суммы параметров ближнего порядка, сопровождающаяся переходом чужеродных атомов из первой во вторую координационную сферу (в процессе отжига нанотрубок), приводит к уменьшению угла наклона кривой электронной теплопроводности УНТ относительно температурной оси;
- высокое значение термоэдс определяется совокупностью характеристик бездефектных УНТ: параметром решетки, импульсом (скоростью) на уровне Ферми и интегралом перескока между ближайшими атомами углерода;
- нелинейное увеличение термоэдс с ростом температуры связано с рассеянием электронов на дефектах структуры УНТ типа ближнего порядка;
- максимум на кривой температурной зависимости термоэдс наблюдается, когда вклад от ПЭС становится больше вклада от времени релаксации. Положение максимума термоэдс в большей степени зависит от хиральности УНТ, чем от параметра ближнего порядка;

- для знака термоэдс определяющим является именно положение примесных атомов. В случае нахождения инородных атомов в первой координационной сфере (неотожженный образец), термоэдс будет положительной. В отожженных образцах в процессе отжига (дегазации) происходит изменение структуры, при котором инородные атомы вытесняются во вторую координационную сферу, и значение термоэдс становится отрицательным;

- изменение концентрации чужеродных атомов существенно не влияет на значение термоэдс.

Таким образом, выявленные в результате нашего исследования физические закономерности в низкотемпературном поведении электронных транспортных свойств в наноуглеродных материалах могут объяснить экспериментально наблюдаемые особенности в поведении низкотемпературных транспортных свойств. Перечисленные свойства оказываются более чувствительны к изменению упорядоченности структуры (перераспределению дефектов между первой или второй координационными сферами) и геометрических характеристик структуры (хиральности для УНТ), чем к изменению концентрации инородных атомов.

***Основное содержание диссертации изложено в работах:***

1. Egorushkin V., Mel'nikova N., Ponomarev A., Bobenko N.G. Low-temperature peculiarities of electron transport properties of carbon nanotubes // Journal of Materials Science and Engineering. 2011. Vol. 1, no.2. Pp. 161-167.

2. V.E. Egorushkin, N.V. Melnikova, N.G. Bobenko & A.N. Ponomarev. Electronic and Transport Properties of Carbon Nanotubes with Impurities and Structure Disorder // Journal of Physical Science and Application. 2012. V2 (7) Pp. 224-232.

3. Бобенко Н.Г., Егорушкин В.Е., Мельникова Н.В., Пономарев А.Н. Плотность электронных состояний и термоэдс в углеродных нанотрубках с примесями и структурным беспорядком // Известия ВУЗов. Физика. 2012. Т.55. №11. с 24-34.

4. Egorushkin V.E., Melnikova N.V., Ponomarev A.N., Bobenko N.G. Electronic density of states of carbon nanotubes // International Conference on Theoretical Physics «DUBNA-NANO 2012». Book of abstracts, 2012. 2010. Pp. 128-128

5. Егорушкин В.Е., Мельникова Н.В., Пономарёв А.Н. Бобенко Н.Г. Низкотемпературное поведение кинетических свойств углеродных нанотрубок // Труды научной сессии МИФИ-2011. Т.2 Фундаментальные проблемы науки. Россия, Москва: 2011. С. 65-66.

6. Егорушкин В.Е., Мельникова Н.В., Пономарёв А.Н. Бобенко Н.Г. Особенности низкотемпературного электронного переноса в углеродных нанотрубках // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному моделированию и разработке новых материалов. Труды конференции, Россия, Томск: 2011. С. 205-206.

7. Egorushkin V.E., Melnikova N.V., Ponomarev A.N., Bobenko N.G. Low-temperature electron transport properties of carbon nanotubes // Thirteenth annual conference «YUCOMAT 2011». Book of abstracts. Herceg Novi, Montenegro, September 5-9, 2011. P. 140.

8. В. Е. Егорушкин, Н. В. Мельникова, А. Н. Пономарев, Н. Г. Бобенко. Низкотемпературные свойства электронного переноса в углеродных нанотрубках. Материалы XLIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», Физика. Новосибирск: 2011. С. 308.

9. Бобенко Н.Г. Плотность состояний в углеродных нанотрубках // Материалы 50-й юбилейной международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Физика твердого тела и электроника. 2012, с. 11.

10. Бобенко Н.Г., Мельникова Н.В., Пономарев А.Н. Методика преподавания курса «Наноматериалы и нанотехнологии». Расчет плотности электронных состояний с учетом упругого рассеяния электронов на примесях и структурных неоднородностях углеродных нанотрубок // Материалы международной научно-методической конференции «Современное образование: проблемы обеспечения качества подготовки специалистов в условиях перехода к многоуровневой системе высшего образования». 2012, с. 61-63.

11. Бобенко Н.Г., Егорушкин В.Е., Мельникова Н.В., Пономарев А.Н. Низкотемпературное электросопротивление в углеродных нанотрубках.// 8-й Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 2012, с. 65-66.

12. Бобенко Н.Г., Егорушкин В.Е., Мельникова Н.В., Пономарев А.Н. Низкотемпературное сопротивление и плотность электронных состояний углеродных нанотрубок// «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ-2012), г. Санкт-Петербург, 2012, С. 53-57.

13. Бобенко Н.Г. Низкотемпературная термоэдс «грязных» металлизированных нанотрубок// «Лазерная физика, наноструктуры, квантовая микроскопия», 2012, с.82-86.

14. Бобенко Н.Г., Пономарев А.Н., Егорушкин В. Е., Мельникова Н. В. Особенности низкотемпературной термоэдс в металлизированных углеродных нанотрубках// V-я Всероссийская конференция молодых учёных «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии», 2012.

15. Bobenko N.G., Egorushkin V.E., Melnikova N.V., Ponomarev A.N. The density of electronic states in grapheme with impurities and structural disorder// The 7<sup>th</sup> Russian-French Workshop on Nanosciences and Nanotechnologies, Program and abstracts book, Russia, Novosibirsk:2013. Pp.69.

16. Egorushkin V., Melnikova N., Ponomarev A., Bobenko N. DOS and electrical resistivity in disordered graphene at low temperatures// 2nd International School-Conference on Nanotechnology and Nanotoxicology, Baikal, August 15<sup>th</sup> –19<sup>th</sup>, 2013( in print)





Подписано в печать 10.08.2013 г.  
Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 120 экз.

---

Отпечатано в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4.